نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v32i1.61713 سال سی و دوم، شمارهٔ یک، ۱۳۹۸

ارزیابی شاخص‌های باربری زمین‌های سست به‌سازی‌شده با گروه ستون سنگی*

«یادداشت پژوهشی»

سعید غفارپور جهرمی[۱] سعید قربان بیگی[۲] مجتبی یعقوبی[۳]

چکیده *در مقالهٔ حاضر به‌روش عددی اجزای محدود، تأثیر عوامل مختلف بر کارایی گروه ستون‌های سنگی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست زمین‌های سست به‌سازی‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق عوامل مختلفی چون نسبت سطح ستون سنگی، سختی مصالح و مشخصات مقاومتی و مکانیکی ستون سنگی و خاک در مقیاس گروه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان تأثیر این عوامل در طراحی و به‌سازی زمین‌های سست مشخص شود. در این مطالعه بیش از ۱۵۰ تحلیل عددی به‌روش سه‌بعدی اجزای محدود در حالات مختلف و با متغییرهای متفاوت برای خاک و ستون سنگی از نظر آرایش، مشخصات هندسی و فنی انجام گرفته‌است تا تأثیر این متغییرها قابل درک و بیان باشد. یکی از مهم‌ترین اهداف این مقاله بررسی اثرات گروه ستون سنگی و متغیرهای مختلف بر ظرفیت باربری زمین‌های سست به‌سازی‌شده می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از ستون‌های سنگی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست زمین‌های سست دارد. میزان این افزایش با زیاد شدن نسبت سطح ستون سنگی به خاک به‌دلیل افزایش برهم‌کنش ستون‌ها تشدید می‌گردد. افزایش ضریب الاستیسیته و زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح ستون و هم‌چنین ضریب پواسون خاک در اطراف ستون‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ظرفیت باربری دارند درحالی‌که با افزایش نسبت پواسون ستون‌های سنگی، افزایش چندانی در ظرفیت باربری دیده نمی‌شود. هم‌چنین بالابودن نسبت سطح جایگزینی (نسبت مساحت ستون‌ها به مساحت کل زمین) علاوه‌بر افزایش ظرفیت باربری، سبب تشدید شیب تأثیر پارامترهای سختی و مقاومتی خاک و ستون بر افزایش ظرفیت باربری می‌گردد که این موضوع مؤید تأثیر گروه می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی به‌سازی خاک، روش اجزای محدود، ستون‌های سنگی، الگوهای شکست، ظرفیت باربری.

Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group

S. Ghaffarpour Jahromi S. Ghorban Beygi M. Yaaghoobi

Abstract *Increasing construction industry and the need to build structures on lands that do not have sufficient load-bearing capacity resulted in the development of soil improvement techniques to enhance site capability. The use of stone columns for the ground improvement for reasons such as environmental compatibility, cost effective, minimizing the liquefaction potential of the ground, settlement reduction, increase of the load-bearing capacity and significant reduction in the period of consolidation is considered as one of the most effective soft soil reinforcement methods. Stone columns can be designed to bear on the hard stratum or as a floating system where the toe is embedded in the soft layer. What in recent years were as the basis for designing of groups of stone columns were based on the theories developed for single stone columns ignoring the group interaction. Most of the existing design methods for stone columns adopt unit cell idealization which is not applicable to spread footing. To assess the influence of various parameters on the performance of a group of stone columns, in this paper which is based on the finite element method, the effect of hardness and resistance parameters affecting the load bearing capacity was discussed. More than 140 analyses of different parameters of soil and stone columns were carried out and were discussed in the form of graphs to compare the effects of these parameters. Results showed that using stone columns had a significant impact on increasing the bearing capacity of the soft grounds. The rate of growing enhances with increase of replacement ratio of stone columns into the soft soil due to group interaction. Increase of elasticity and internal friction angle of column materials as well as soil Poisson's ratio have a significant impact on increasing load-bearing capacity on the other hand when Poisson's ratio of stone columns increases any substantial change isn't see. In addition of bearing capacity increase, growth of replacement ratio enhances the impact of strength and stiffness parameters of soil and columns on bearing capacity increase which shows the influence of the group interaction. End bearing columns were observed as a factor influencing the increase of bearing capacity and intensifying the effect of stiffness and strength parameters on column bearing capacity.*

Keywords Stone Columns, Bearing Capacity, Finite Element Method, Ground Improvement, Group Effect.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۳۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. **Email:** saeed_ghf@sru.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی.

(۳) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

استفاده از ستون ماسه‌ای یا شنی که به‌طور عام ستون‌های سنگی نامیده می‌شوند، به‌منظور به‌سازی درجای خاک‌های ضعیف از دهۀ ۱۹۵۰ در اروپا و از دهۀ ۱۹۷۰ در آمریکا به‌صورت گسترده رواج پیدا کرده‌است. این روش به‌خصوص برای بهبود رفتار رس نرم و ماسۀ لای‌دار سست کاربرد دارد. در این روش بخشی از خاک نامرغوب با مصالح دانه‌ای متراکم‌شده جایگزین می‌شود. این ستون مصالح متراکم عموماً تا لایۀ مقاوم‌تر امتداد پیدا می‌کند. در بین روش‌های مختلف به‌سازی خاک، استفاده از ستون‌های سنگی به‌عنوان روشی ساده، سریع و اقتصادی در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته‌است. این روش برای تحمل وزن سازه‌های دارای بار سبک تا متوسط مانند راه‌ها، خاکریزها، مخازن، انبارها، پل‌ها و ساختمان‌های مسکونی بسیار مناسب است. در اجرای ستون سنگی، عملیات حفاری یک گمانه‌ای به‌قطر ۳۰ cm تا ٤٥ cm به‌روش مرطوب (به‌وسیلۀ جت آب) و یا به‌روش خشک (در خاک نیمه‌اشباع) انجام می‌گیرد. سپس این گمانه به‌ارتفاع ۳۰cm تا ۱۲۰cm با مصالح دانه‌ای پُر و به‌وسیلۀ لولۀ حفاری چندین مرتبه متراکم و به درون خاک اطراف رانده می‌شود و این فرایند تا پر شدن کامل گمانه ادامه می‌یابد. قطر مصالح دانه‌ای استفاده‌شده در ستون سنگی ۱۲mm تا ۷۵mm است. البته می‌توان از خرده آجر یا خرده بتن استفاده کرد. استفاده از سیمان در ستون سنگی سبب افزایش سرعت اجرا و تقویت ستون سنگی می‌شود. از این روش می‌توان در خاک‌های خیلی ضعیف و یا افزایش پایداری شیروانی بهره جست[۱].

برای اصلاح خاک در سطح وسیع از ستون‌های سنگی با فواصل مشخص استفاده می‌شود که به گروه ستون سنگی موسوم هستند. حداقل فاصله بین ستون‌های سنگی ۱/۵ m است اما به‌طور معمول از فاصلۀ ۱/۸m تا ۲/۷m استفاده می‌شود. در این روش تقریباً ۱۵ تا ۳۵ درصد خاک سست با سنگدانه جایگزین می‌شود. وجود این ستون‌ها در فواصل معین سبب ایجاد سیستمی مرکب با تراکم‌پذیری کمتر و مقاومت برشی بیشتر نسبت به خاک اولیه می‌شود. این سیستم در هنگام اعمال سربار به آن، به‌دلیل سختی بالایی که دارد بیشتر نیرو را متحمل می‌شود. البته سختی بالای ستون سنگی به‌دلیل دورگیری آن توسط خاک اطراف است. بار طراحی هر ستون سنگی مابین ۲۰ تا ۵۰ تن است. ستون سنگی کاربردهای زیادی دارد که از جملۀ آنها می‌توان به افزایش پایداری شیروانی‌های طبیعی و خاکریزهای دستی، افزایش ظرفیت باربری پی‌ها، کاهش نشست کل و تفاضلی پی‌ها، کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه و تسریع در نشست تحکیمی اشاره کرد. ستون‌های سنگی برای شالوده‌سازه‌های مستقر بر بستر رس نرم تا رس سخت و ماسۀ لای‌دار سست با ریزدانه بیش از ۱۵ درصد کاربرد فراوانی دارند. اقتصادی‌ترین حالت استفاده از ستون سنگی وقتی است که لایۀ باربر در عمق ٦ تا ۱۰ متری قرار گرفته باشد. ستون سنگی به‌طور معمول میزان نشست را به ۳۰ تا ۵۰ درصد مقدار اولیه کاهش می‌دهد. هم‌چنین استفاده از ستون سنگی در خاک‌های دارای مقاومت زهکشی‌نشده کمتر از ۵۰kPa تا ۱۰۰kPa توصیه شده‌است. باید توجه داشت که در خاک‌های حساس و دارای لنزهای خاک ارگانیک و نباتی، به‌دلیل تراکم‌پذیری بالایی که وجود دارد، ستون سنگی محصورشوندگی کمی پیدا می‌کند که می‌تواند منجر به تغییرمکان قائم زیاد گردد [2].

ستون‌های سنگی اولین‌بار در فرانسه توسط موراَو و همکاران [3] برای تقویت پی در صنایع نظامی به‌کار گرفته شد. آنها از ستون‌هایی با قطر ۲۰cm و ارتفاع ۲m استفاده کردند و کاهش نشست و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری را مشاهده کردند. بعدها استورمن [3] تکنیک تراکم ارتعاشی را که شامل استفادۀ هم‌زمان از تزریق پرفشار آب و ویبره در خاک می‌باشد برای نصب ستون سنگی ارائه کرد. استفادۀ هم‌زمان از این دو این قابلیت را به دستگاه می‌دهد که با وزن خود به عمق مورد نظر نفوذ کند. این روش در دهۀ ۱۹٤۰ در آمریکا و آلمان

توسعه یافت، به‌گونه‌ای که در اواخر دهۀ ۱۹۵۰ عمق ستون سنگی تا ۲۰m افزایش یافت. تکنیک ستون سنگی از سال ۱۹۵۵ به‌طور گسترده در ژاپن مورد استفاده بوده‌است [3]. در حال حاضر از این روش به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های بهسازی زمین در سراسر جهان استفاده می‌گردد.

هم‌زمان با تحقیقات میدانی، بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی نیز به‌منظور کاوش مکانیزم باربری زمین‌های مسلح با ستون سنگی توسعه یافته‌است. بالام[4] یک زمین مسلح‌شده با ستون‌های سنگی را بااستفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی کرد که یک پی گستردۀ انعطاف‌پذیر را تحمل می‌کرد. وی برای مصالح ستون و خاک از معیار گسیختگی موهر- کولمب استفاده نمود. نتایج این بررسی نشان داد که نشست محاسبه‌شده بااستفاده از تحلیل الاستیک فقط ٦٪ با تحلیل پلاستیک متفاوت است. وی مشاهده کرد وقتی نسبت سطح جایگزینی حدود ۲۵٪ است (نسبت مساحت ستون‌ها به مساحت کل زمین)، کاهش قابل توجهی در نشست دیده می‌شود. هم‌چنین مشخص شد که افزایش طول ستون و کاهش فاصلۀ بین ستون‌ها باعث افزایش نشست خواهد شد.

بائی و همکارانش[5] به بررسی یک مدل آزمایشگاهی از گروه ستون‌های سنگی پرداختند و ضمن مقایسۀ نتایج آن با نتایج حاصل از مدل عددی اجزای محدود، هماهنگی بین نتایج را گزارش کردند. وهر و همکارانش[6] رفتار یک ستون تک و یک گروه از ستون‌های سنگی را بااستفاده از تحلیل اجزای محدود در حالت کرنش مسطح مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۷ آنالیزهای تجربی و عددی بر ستون‌های سنگی به‌صورت تک و گروهی، توسط امبیلی و گندی[7] هدایت شد. آنها علاوه‌بر مقایسۀ نتایج بارگذاری بر ستون منفرد و گروهی، تأثیر پارامترهایی مانند نحوۀ بارگذاری، مقاومت برشی خاک اطراف و فاصلۀ بین ستون‌ها را نیز بررسی کردند.

آندریو و پاپادوپولوس[8] تأثیر میزان بار، نسبت سطح، زاویۀ اصطکاک داخلی و مقاومت برشی زهکشی‌نشده بر تغییرمکان افقی یک ستون سنگی را در یک خاک چسبنده مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. ستون تحت بارگذاری گسترده از طریق یک پی صلب قرار گرفت و بااستفاده از مفهوم «سلول واحد» مدل‌سازی شد. آنها بااستفاده از یک تحلیل اجزای محدود به‌صورت تقارن محوری، درحالی‌که از مدل موهر- کولمب برای ستون و خاک استفاده می‌کردند، تأثیر متغییرهای مورد نظر را بر زمین بهسازی‌شده بررسی کردند. کریش و همکارانش[9] با انجام یک تحلیل اجزای محدود بر روی دو پی که توسط ۲۵ ستون تقویت شده بودند، تأثیر افزایش طول ستون و مشخصات مکانیکی خاک را با نسبت‌های سطح جایگزینی مختلف، مورد بررسی قرار دادند. مایکل کلین و همکارانش[10] در رسالۀ دکتری خود، ضمن طرح تفاوت بین گروه‌های کوچک و گروه‌های بزرگ ستون‌های سنگی، رفتار گروه‌های کوچک ستون سنگی در زیر پی‌های با مساحت کوچک را مورد بررسی قرار داد. وی اثر پارامترهای کلیدی طراحی مانند نسبت سطح، طول ستون، سختی، مقاومت و اثرات نصب بر عملکرد نشست و رفتار تغییرشکل گروه‌های کوچک ستون‌های سنگی را در مجموع با ٤٥ تحلیل عددی به‌صورت بعدی بررسی کرد. تحقیقات وی نشان داد که تعداد ستون، نسبت سطح و طول ستون بر مکانیزم انتقال بار برای گروه‌های کوچک ستون سنگی تأثیر زیادی دارد. هانا و همکاران [11] به بررسی میزان برهم‌کنش بین ستون‌ها در گروه ستون سنگی و تأثیر آن در نحوۀ شکست ستون سنگی پرداختند. آنها در مدل‌های عددی خود که به‌صورت کرنش مسطح در نرم‌افزار عددی به‌صورت دوبعدی انجام گردید، عوامل موثر بر نحوۀ تغییرشکل و شکست گروه ستون سنگی اجرا شده در یک خاک نرم و تحت یک پی گسترده را مورد بررسی

قرار دادند.

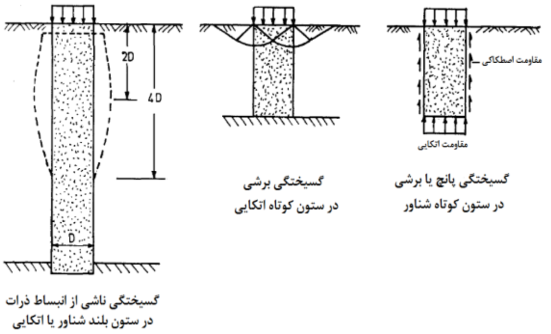
سادگی اجرا، هزینهٔ کم و عملکرد مناسب ستون سنگی باعث شده‌است استفاده از این روش به‌سازی خاک، رشد روزافزونی در کشورهای مختلف داشته باشد اما باوجود استفادهٔ گسترده، تحقیقات در این زمینه به‌دلیل پیچیدگی در مدل‌سازی محیط‌های ترکیبی متشکل از خاک و ستون، پیشرفت مناسبی نداشته باشد؛ لذا روند طراحی ستون سنگی هم‌چنان برمبنای روش‌ها و تئوری‌های تجربی براساس مفهوم «سلول واحد» است که اثر برهم‌کنش گروه را در نظر نمی‌گیرد و ظرفیت نهایی را برابر با مجموع بار ستون‌های تکی محاسبه می‌کند. براساس تئوری سلول واحد، ستون بر اثر انبساط جانبی دچار شکست می‌شوند، درحالی‌که در گروه، ستون‌ها بر اثر شکست کلی گروه و خاک اطراف گسیخته می‌شوند. هدف از این مقاله و تحقیق بررسی اثرات گروه و متغیرهای مختلف سختی و مقاومتی مؤثر بر ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی‌شده توسط گروه ستون‌های سنگی می‌باشد که کمتر مورد توجه محققان و آیین‌نامه‌های به‌سازی زمین‌های سست قرار گرفته‌است.

الگوهای شکست در زمین‌های به‌سازی‌شده با ستون سنگی

شناخت و بررسی الگوها و نحوهٔ شکست و هم‌چنین عوامل مؤثر بر رفتار تغییرشکلی زمین‌های مسلح‌شده با ستون سنگی به‌عنوان یک مبنا در تعیین و تخمین ظرفیت باربری و هم‌چنین راهکار افزایش ظرفیت باربری در این زمین‌ها حائز اهمیت می‌باشد. آنچه مسلم است شکست ستون‌های سنگی به‌صورت انبساط جانبی، شکست برشی (ستون، پانچ و کلی)، خمش و کمانش مشاهده شده‌است.

تغییرشکل و شکست ستونها در اثر انبساط جانبی اولین و رایج‌ترین نحوهٔ شکست پیش‌بینی‌شده توسط محققان بوده‌است (شکل ۱). این روش در اولین تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده بر ستون سنگی منفرد به‌عنوان مکانیزم شکست ستون سنگی اعلام شد [12].

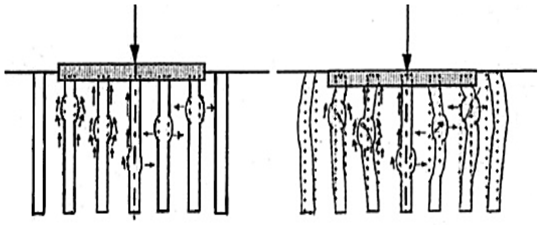
محل انبساط جانبی در فاصلهٔ چهار برابر قطر از بالای ستون مشاهده شده و طول محدودهٔ انبساط جانبی ۲/۵ تا ۳ برابر قطر ستون گزارش شده‌است [13]. برمبنای این مکانیزم در تغییر شکل، مفهوم سلول واحد برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های سنگی ارائه گردید که ظرفیت باربری گروه ستون‌های سنگی را برابر با مجموع ظرفیت باربری تک‌تک ستون‌های موجود در گروه در نظر می‌گیرد. در تئوری سلول واحد هر ستون و خاک اطرافش به‌عنوان یک مجموعهٔ مستقل در نظر گرفته می‌شود، لذا تغییرشکل جانبی و تنش برشی در مرزهای سلول صفر فرض می‌گردد [14].



شکل ۱ روش‌های متداول گسیختگی ستون سنگی منفرد [12]

تغییرشکل انبساط جانبی در قسمت‌های بالایی ستون‌های بلند اتفاق می‌افتد درحالی‌که در قسمت‌های پایینی این ستون‌ها و هم‌چنین در ستون‌های کوتاه، کمتر با این‌گونه تغییر شکل مواجه می‌شویم. دلیل این امر نبود یا کمبود انتقال بار به کف در این شرایط می باشد [15]. وقوع این الگوی تغییرشکل در گروه ستون‌های سنگی تحت تأثیر برهم‌کنش بین ستون‌ها متفاوت است. در این ستون‌ها در اثر انحصار جانبی ناشی از ستون‌های مجاور، انبساط جانبی کمتر اتفاق می‌افتد و محل وقوع آن بسته به میزان انحصار جانبی وارد بر ستون در عمق‌های متفاوتی رخ می‌دهد، به‌گونه‌ای که در ستون‌های میانی گروه که بیشترین انحصار جانبی بر اثر نیروی برهم‌کنش بین ستون‌ها به آنها وارد می‌شود، انبساط جانبی در عمق بیشتری اتفاق می‌افتد ولی با نزدیک شدن به ستون‌های

کناری گروه، این عمق کاهش می‌یابد و محل انبساط جانبی به سطح زمین نزدیک‌تر می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲ انبساط جانبی در گروه ستون سنگی قبل و بعد از شکست [15]

به‌طور کلی انبساط جانبی در گروه ستون سنگی به‌دلیل اثر برهم‌کنش بین ستون‌ها نمی‌تواند باعث شکست گردد و تنها در گروه ستون سنگی با نسبت سطح جایگزینی پایین، قابل طرح به‌عنوان الگوی شکست می‌باشد به‌طوری‌که با کاهش نسبت سطح جایگزینی، اثر برهم‌کنش گروه کاهش می‌یابد و برای نسبت‌های سطح جایگزینی خیلی کم، شکست ناشی از انبساط جانبی ممکن است اتفاق بیفتد [5]. محققان نسبت سطح جایگزینی ۱۰٪ را به‌عنوان محدودهٔ تغییر نحوه و مُد شکست در گروه ستون سنگی مطرح می‌کنند و اذعان دارند شکست ناشی از انبساط جانبی برای ستون‌های یک گروه تنها وقتی نسبت سطح جایگزینی کمتر از ۱۰٪ است است رخ می‌دهد [12]. برای کاهش انبساط جانبی ستون‌های سنگی نصب‌شده در خاک‌های خیلی نرم که نمی‌توانند انحصار لازم برای جلوگیری از این تغییرشکل را ایجاد کنند معمولاً از روکش ژئوسنستیک استفاده می‌شود. روکش کردن ستون‌های سنگی علاوه‌بر افزایش مقاومت و سختی، از فرورفتن دانه‌های درشت به خاک نرم اطراف نیز جلوگیری می‌کند [16].

شکست برشی به‌دلیل وقوع برش در ستون‌های سنگی و خاک‌های اطراف نیز یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل شکست زمین‌های مسلح‌شده با گروه ستون سنگی می‌باشد. تعیین روش‌های مناسب برای افزایش مقاومت و جلوگیری از این نحوهٔ شکست مستلزم شناخت دقیق رفتار زمین مسلح‌شده و پارامترهای تأثیرگذار بر چگونگی رخداد آن می‌باشد [17].

برش پانچ یا پانچینگ ستون سنگی زمانی رخ می‌دهد که طول ستون به‌منظور انتقال بار به عمق، زیاد نباشد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که در ستون سنگی کوتاه یعنی با نسبت طول به قطر کمتر از ٦، تورم در سراسر طول رخ می‌دهد و ستون در خاک رس پانچ می‌شوند. این نحوهٔ تغییرشکل بیشتر در ستون‌های نزدیک به هم یعنی با نسبت سطح جایگزینی بالا رخ می‌دهد. ستون‌های بلند به‌طور قابل توجهی در ناحیهٔ بالا دچار تغییر شکل می‌شوند درحالی‌که بخش پایینی بدون تغییر می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد نبودن یا کم بودن انتقال بار به کف در ستون‌های بلند باعث عدم گسیختگی پانچ و وقوع سایر مدهای گسیختگی نظیر تورم یا برش می‌شود؛ لذا نسبت طول به قطر حدود ٦ به‌عنوان طول بحرانی ستون سنگی در طراحی فرض می‌گردد [18].

برش کلی نیز نوعی دیگر از مکانیزم شکست ستون سنگی می‌باشد که بررسی آن در خاک‌های نرم نشان می‌دهد که به‌دلیل بر هم‌کنش ستون، گسیختگی به‌صورت مخروطی‌شکل و در قالب شکست برشی کلی رخ خواهد داد. در این حالت تغییرشکل ستون به شکل‌های مختلف (انبساط جانبی، پانچ، برش و خمش) مشاهده شده‌است اما شکست گروه ستون سنگی به‌صورت شکست برشی کلی می‌باشد. شکست خمشی در ستون سنگی زمانی رخ می‌دهد که ستون تحت بار جانبی قرار گیرد. این تغییر شکل بیشتر در ستون‌های کناری که تنها از یک سو تحت تأثیر نیروی جانبی ناشی از تورم سایر ستون‌ها می‌باشند، دیده می‌شود که می‌تواند باعث وقوع شکست در ستون‌های سنگی گردد [19-21].

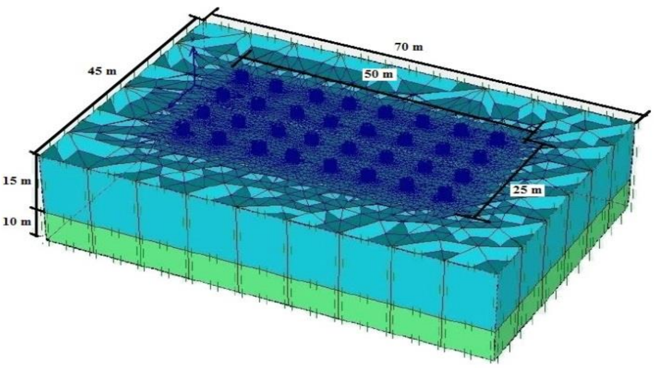
شکست ناشی از کمانش در ستون‌های کناری یک گروه و زمانی‌که طول ستون از طول بحرانی کمتر است، محتمل می‌باشد. برای محاسبهٔ طول بحرانی، محققان

بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی انجام دادند و همگی اذعان داشتند که دامنهٔ کرنش در ستون به قطر پی وابسته است و با قطر ستون ارتباطی ندارد [22].

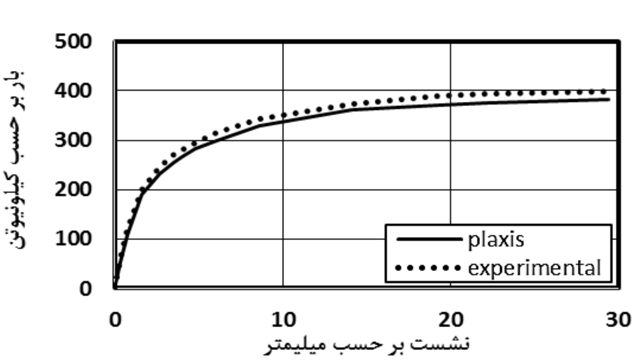
صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و دقت‌سنجی مدل‌سازی عددی

به‌منظور ارزیابی صحت و دقت و اعتبار نتایج تحلیل‌های عددی، از داده‌های تجربی تحقیقات رائو و همکارانش استفاده شد[20]. در مطالعهٔ آنان که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد، یک محفظهٔ استوانه‌ای به‌قطر ۶۵۰mm و ارتفاع ۳۵۰mm از خاک رس پُر شد و یک ستون سنگی با قطر ۲۵mm و ارتفاع ۲۲۵mm در آن نصب گردید. بارگذاری روی ستون سنگی توسط یک صفحهٔ مدور به‌قطر دو برابر قطر ستون سنگی اعمال گردید. با مدل‌سازی آزمایش فوق در نرم‌افزارPlaxis 3D، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد سنجش قرار گرفت. این نرم‌افزار برای تحلیل تغییرشکل‌ها در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد فراوانی دارد، به‌خصوص در مسائلی که نیازمند یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان باشد. از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار توانایی در تعریف مدل‌های مختلف رفتاری خاک می‌باشد (شکل ۳).

به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل، منحنی بار–جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی رائو و همکارانش در شکل (٤) نشان داده شده‌است. این منحنی تقریب و همگرایی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی براساس مدل گسیختگی موهرکولمب برای خاک و ستون سنگی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد به‌طوری‌که با دقت مناسبی بالاتر از ۹۵ درصد بر هم منطبق هستند.



شکل ۳ شماتیک مدل‌سازی ستون سنگی



شکل ٤ مقایسهٔ منحنی بار– جابه‌جایی مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

مدل گسیختگی موهرکولمب یک مدل الاستوپلاستیک کامل از ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در تحلیل‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. دلیل این امر تعداد متغیرهای کم بدون نیاز به آزمایش‌های پیچیده است. در مدل موهر از معیار گسیختگی موهر- کولمب به‌عنوان سطح تسلیم استفاده شده و قانون جریان در حالت برشی به‌صورت غیروابسته فرض می‌گردد. در استفاده از این مدل بایستی توجه کرد که از برخی جنبه‌های رفتاری اساسی خاک مانند وابسته بودن سختی به مسیر و تاریخچهٔ تنش و کرنش در آن صرف‌نظر شده‌است.

بررسی و ارزیابی تأثیر متغییرهای مختلف بر باربری گروه

یکی از اهداف این پژوهش، بررسی و مطالعهٔ اثرات متغییرهای مختلف خاک چون مدول الاستیسیته، زاویهٔ اصطکاک داخلی و ضریب پواسون بر ظرفیت باربری آن است. با استناد به مطالعات محققان مختلف، ظرفیت باربری خاک مسلح‌شده با ستون سنگی برابر با بار متناظر با نشست معادل ۰/۱ قطر ستون سنگی تعریف می‌شود [3, 18, 19]. مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) آمده‌است. هم‌چنین دامنه و محدودهٔ محدودهٔ بررسی متغییرها در جدول (۲) آمده‌است.

جدول ۱ مشخصات مصالح خاک و ستون سنگی در این تحقیق

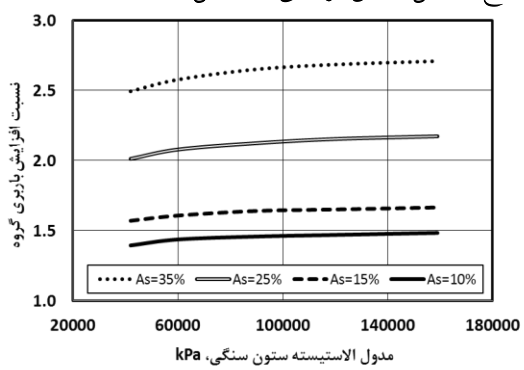
مشخصه	متغیر	واحد	رس	ستون سنگی
مدول الاستیسیته	E	kPa	۳۰۰۰	۶۰۰۰۰
ضریب پواسون	ν	–	۰/۲۵	۰/۳
زاویهٔ اصطکاک داخلی	ϕ	درجه	۲۰	۴۰
چسبندگی	C	kPa	۵	۰
زاویهٔ اتساع	ψ	درجه	۰	۱۰
وزن مخصوص	γ_d	kN/m^3	۱۶	۱۸
وزن مخصوص اشباع	γ_{sat}	kN/m^3	۱۸	۲۰

جدول ۲ دامنهٔ تغییرات مشخصات خاک و ستون سنگی در این مطالعهٔ عددی

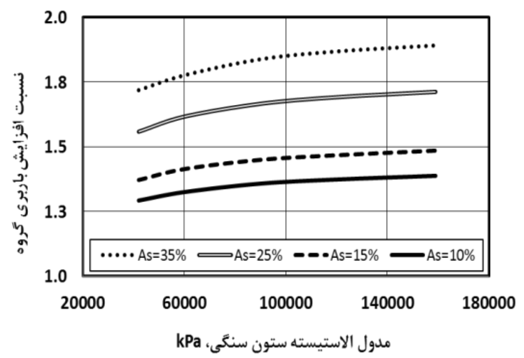
مشخصه	متغیر	واحد	محدوده
زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی	ϕ_s	درجه	۳۵ تا ۴۵
زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک رس	ϕ_c	درجه	۱۵ تا ۲۵
مدول الاستیسیتهٔ مصالح ستون سنگی	E_s	kPa	۴۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰
مدول الاستیسیتهٔ خاک رس	E_c	kPa	۱۵۰۰ تا ۱۴۵۰۰
ضریب پواسون مصالح ستون سنگی	ν_s	–	۰/۲ تا ۰/۴۵
ضریب پواسون خاک رس	ν_c	–	۰/۱۵ تا ۰/۴۵
نسبت جایگزینی	A_s	درصد	۱۰٪ تا ۳۵٪

تأثیر مدول الاستیسیته و سختی ستون سنگی بر ظرفیت باربری گروه

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیتهٔ ستون سنگی، تقسیم بار بین ستون و خاک رس تغییر می‌کند و سهم بار ستون افزایش می‌یابد مشروط بر آن‌که دیگر متغییرها مطابق جدول (۱) ثابت باشند. از سوی دیگر برای تعیین میزان تأثیر این عامل بر میزان افزایش ظرفیت باربری زمین‌های مسلح‌شده با ستون سنگی در قیاس با زمین تسلیح‌نشده، از تعریف «نسبت افزایش باربری» استفاده می‌شود یعنی نسبت نیروی قابل تحمل توسط زمین مسلح‌شده به زمین غیرمسلح در نشست یکسان به‌عنوان نسبت افزایش باربری تعریف می‌شود. نتایج حاصل از این بررسی در شکل (۵) و (٦) آمده‌است.



شکل ۵ تأثیر مدول الاستیسیتهٔ ستون سنگی بر نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت اتکایی



شکل ٦ تأثیر مدول الاستیسیتهٔ ستون سنگی بر نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت شناور

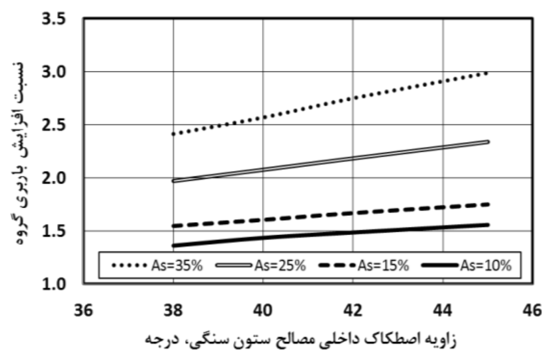
دقت در نتایج حاصل از این بررسی نشان‌دهندهٔ تأثیر قابل توجه ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری زمین‌های سست است. با افزایش «نسبت سطح جایگزینی» از ۱۰ درصد تا ۳۵ درصد، ظرفیت باربری به‌طور قابل توجهی تا حدود ۳ برابر بالا می‌رود. لازم به ذکر است افزایش نسبت سطح جایگزینی(A_s) به بیش از ۳۵٪ به‌دلیل مشکلات اجرایی عملاً مقدور نمی‌باشد. نتایج در شکل (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که با افزایش مدول الاستیسیتهٔ مصالح ستون سنگی، نسبت افزایش باربری نیز فزونی می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش نسبت سطح، این تغییرات شدیدتر می‌گردد که دلیل آن حضور بیشتر مصالح ستون سنگی در خاک مسلح‌شده می‌باشد زیرا پارامترهای مکانیکی مقاوم‌تری دارد. هم‌چنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیسیتهٔ ستون سنگی، تأثیر این متغییر بر افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقایسهٔ شکل (۵) و (٦) نشان می‌دهد که تأثیر ستون سنگی اتکایی در افزایش ظرفیت باربری زمین به‌مراتب بیش از ستون سنگی شناور است به‌طوری‌که این تأثیر با افزایش نسبت جایگزینی تشدید می‌شود.

تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی ستون سنگی بر ظرفیت باربری گروه

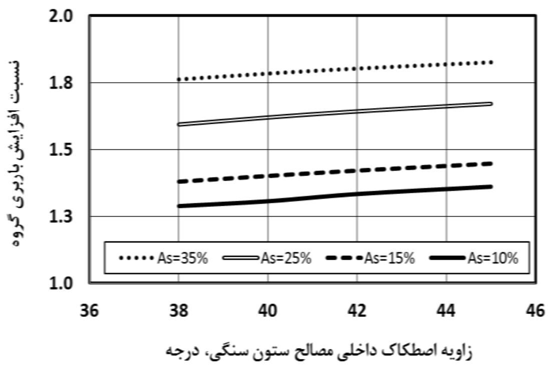
در ادامهٔ این تحقیق به بررسی تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی سنگدانه‌های متراکم ستون سنگی بر ظرفیت باربری پرداخته می‌شود. نتایج این بررسی در نسبت‌های سطح جایگزینی مختلف، در شکل‌های (۷) و (۸) به‌تفکیک برای ستون سنگی شناور و اتکایی نشان داده شده‌است.

نتایج حاصل از شکل (۷) و (۸) نشان می‌دهند که ظرفیت باربری با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی سنگدانه‌های ستون سنگی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که این سیر صعودی با افزایش نسبت جایگزینی، شدیدتر می‌شود. با تغییر زاویهٔ اصطکاک داخلی در نسبت جایگزینی ۳۵ درصد شاهد افزایش ظرفیت باربری تا بیش از ۵۰ درصد هستیم. مقایسهٔ شکل

(۷) و (۸) نشان می‌دهند که تأثیر شمع اتکایی در افزایش ظرفیت باربری بیش از شمع شناور است، هم‌چنین شیب منحنی در شمع شناور تغییر چندانی ندارد اما در شمع اتکایی بسیار بارز است. قابل مشاهده است که با افزایش سطح جایگزینی این تمایز بیشتر می‌شود. در مجموع باید گفت که دو عامل اتکایی بودن و نسبت سطح جایگزینی، تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی را تشدید می‌کند.



شکل ۷ تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت اتکایی

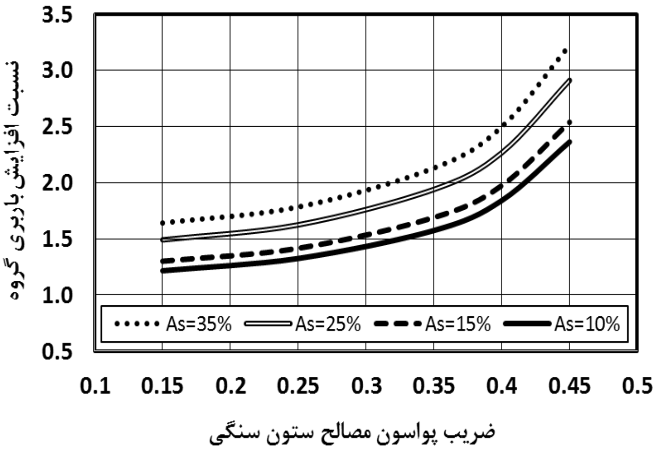


شکل ۸ تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت شناور

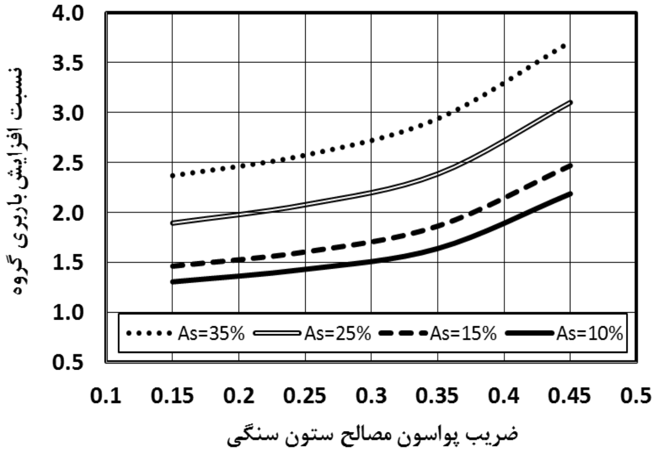
تأثیر نسبت پواسون ستون سنگی و خاک اطراف بر ظرفیت باربری گروه

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری، ضریب پواسون مصالح ستون سنگی می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت پواسون در مصالح، تغییرشکل افقی تحت یک تغییرشکل قائم ثابت، افزایش می‌یابد و به‌عبارتی قابلیت فشردگی مصالح کاهش می‌یابد. در این بررسی با نسبت سطح جایگزینی مختلف، ضرایب پواسون خاک و ستون سنگی به‌طور مجزا و مستقل تغییر داده شده که نتایج به‌دست‌آمدهٔ آن در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده‌است.

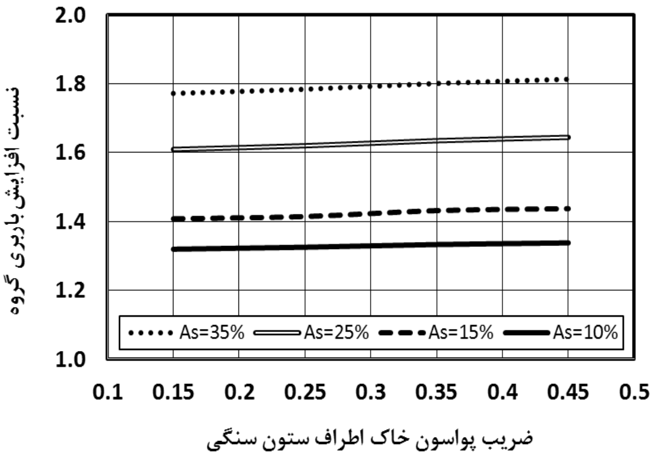
همان‌گونه که از شکل (۹) تا (۱۲) قابل استنتاج است، این بررسی نشان می‌دهد که افزایش نسبت پواسون در مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. در این مسئله تأثیر قابلیت فشردگی مصالح زیر پی در انتقال و تأثیر بارگذاری به ستون سنگی و مصالح جانبی توجیه می‌گردد. با افزایش نسبت پواسون، مصالح خاک و ستون غیر قابل تراکم‌تر می‌شوند و تمایل دارند نشست قائم ناشی از بارگذاری را به‌صورت تغییرمکان و تغییرشکل افقی به خاک اطراف خود و به دنبال آن به ستون سنگی مجاور منتقل کنند. این اتفاق باعث خواهد شد نیروی قائم ناشی از پی به‌صورت یک نیروی افقی و به شکل انبساط جانبی مصالح منتقل شود؛ لذا استهلاک و پخش نیروی قائم وارد بر پی می‌تواند تحت تأثیر محدودیت جانبی قرار گیرد به این معنی که افزایش ضریب پواسون خاک و ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. هم‌چنین نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر ظرفیت باربری بسیار بیشتر از ضریب پواسون خاک می‌باشد، به‌طوری‌که شیب تغییرات به‌شدت افزایش می‌یابد درحالی‌که نسبت پواسون خاک تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری ندارد. در ادامه بررسی نتایج حاصل از مقایسهٔ شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) آشکار می‌شود که نسبت سطح جایگزینی (A_s) و اتکایی بودن ستون سنگی، نیز همچنان در افزایش ظرفیت باربری بسیار مؤثر هستند.



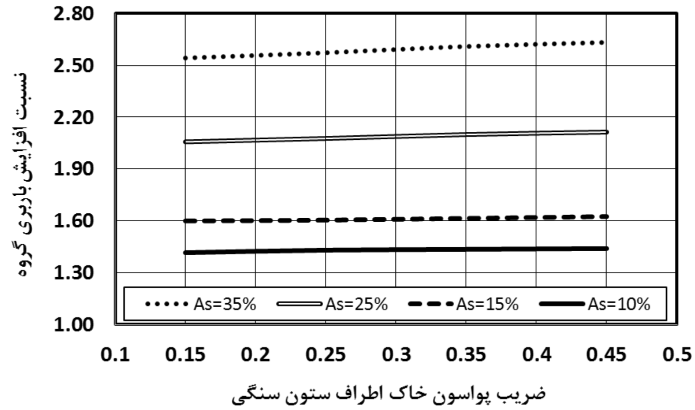
شکل ۹ تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر نسبت افزایش باربری گروه در حالت شناور



شکل ۱۰ تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر نسبت افزایش باربری گروه در حالت اتکایی



شکل ۱۱ تأثیر ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت شناور



شکل ۱۲ تأثیر ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت اتکایی

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با روش عددی به ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی‌شده بااستفاده از ستون سنگی در زیر یک پی صلب و گسترده پرداخته شده‌است. تحلیل عددی بااستفاده از آخرین نسخهٔ نرم‌افزار Plaxis 3D به‌روش اجزای محدود انجام شده‌است. هم‌چنین رفتار طولانی مدت زمین به‌سازی‌شده در شرایط تحکیم‌یافتهٔ زهکشی‌شده با مدل رفتاری موهرکولمب مورد بررسی قرار گرفته و حدود ۱۵۰ تحلیل مختلف از شرایط با متغییرهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌است که نتایج آن در قالب گراف و منحنی با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌است.

نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که عواملی چون میزان مدول الاستیسیته و زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی و هم‌چنین ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی‌شده با این روش دارند ضمن این‌که تأثیر ضریب پواسون مصالح ستون سنگی بسیار کم و قابل اغماض است. هم‌چنین بررسی‌ها حاکی از این واقعیت است که اتکایی بودن ستون سنگی افزایش قابل توجهی بر ظرفیت باربری دارد، به‌طوری‌که این افزایش وابستگی بالایی به مدول الاستیسیتهٔ مصالح ستون سنگی و وابستگی کمتری به زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک اطراف ستون دارد. هم‌چنین ظرفیت باربری در ستون اتکایی با افزایش ضریب پواسون خاک کاهش می‌یابد.

از دیگر نتایج این تحقیق کاهش تأثیر مدول الاستیسیتهٔ ستون سنگی بر افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالای این متغییر می‌باشد درحالی‌که عکس این مطلب در مورد ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی اتفاق می‌افتد، به‌طوری‌که بیشتر تأثیر ضریب پواسون خاک بر افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالا رخ می‌دهد. هم‌چنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزایش نسبت سطح جایگزینی علاوه‌بر افزایش ظرفیت باربری، میزان تأثیر عواملی چون سختی محوری و مشخصات مکانیکی مصالح ستون سنگی بر ظرفیت باربری را نیز افزایش می‌دهد. این مسئله در تأثیر ضریب اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی مشهود و بارزتر از تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. رابطهٔ ضریب اصطکاک داخلی با ضریب پواسون مصالح ستون سنگی بر ظرفیت باربری خطی است اما مدول الاستیسیته و ضریب پواسون خاک با ظرفیت باربری رابطه‌ای غیرخطی دارند.

سپاس گزاری

خورسندی که در به ثمر رسیدن این پژوهش همکاری از خانم دکتر زینت سلیمان‌پور و آقای مهندس مهدی شایانی داشتند تقدیر می‌گردد.

مراجع

۱. قضاوی، محمود و نظری افشار، جواد، «طراحی و روش‌های اجرای ستون‌های سنگی»، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۸)

2. Guetifa Z., Bouassidaa M. and Debatsb J., "Improved Soft Clay Characteristics due to Stone Column Installation", Computers and Geotechnics, Vol. 34, No. 2, Pp. 104–111, (2007).
3. Etezad, M., "Geotechnical Performance of Group of Stone Columns", PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Canada (2007).
4. Balaam N. and Booker J. R., "Effect of Stone Column Yield on Settlement of Rigid Foundations in Stabilized Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 9, No. 4, Pp. 331–351, (1985).
5. Bae, W., Bang, W. and Byung, C., "Behavior of Foundation System Improved with Stone Columns", *Proc., 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Int. Society of Offshore and Polar Engineers,* Cupertino, CA, (2002).
6. Wehr, W., "Stone Columns-single Columns and Group Behavior", *Proc. 5th Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, Malaysia, Pp. 329–340, (2004).
7. Ambily, A. P. and Gandhi, S. R., "Behavior of Stone Columns based on Experimental and FEM Analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 4, ASCE, Pp. 405-415, (2007).
8. Andreou, P. and Papadopoulos, V., "Modelling Stone Columns in Soft Clay", *Proc. 6th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Graz, Pp. 777–780, (2006).
9. Kirsch, F., "Evaluation of Ground Improvement by Groups of Vibro Stone Columns Using Field Measurements and Numerical Analysis", Proc. of the 2nd Int. Workshop on the Geotechnics of Soft Soils, Glasgow, Pp. 241–248, (2008).
10. Micheal, K., "Numerical Modelling of Small Groups of Stone Columns", Ph.D. Thesis, National University of Ireland, Galway, (2012).
11. Hanna, A., Etezad, M. and Ayadat, T., "Mode of Failure of a Group of Stone Columns in Soft Soil", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, Pp. 87-96, (2013).
12. Hughes, J. and Withers, N., "Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns", Ground Eng., Vol. 7, No.3, Pp. 42-49, (1974).
13. Christoulas, S., "An Experimental Study on Model Stone Columns", Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, Pp. 12-22, (2000).

14. McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and Graham, J., "Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay", Proc. Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 157, No. 3, Pp. 137–149, (2004).

15. Hu, W., Wood, D. M. and Stewart, W., "Ground Improvement Using Stone Column Foundations: Result of Model Tests", *Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, CI-Premier, Singapore, Pp. 247-256, (1997).

16. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Geosynthetic-encased Stone Columns: Numerical Evaluation", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 24, Pp. 349-358, (2006).

17. Wood, D., Hu, W. and Nash, D., "Group Effects in Stone Column Foundations: Model Tests", Geotechnique, Vol. 50, No. 6, Pp. 689-698, (2000).

18. Hu, W., "Physical Modeling of Group Behavior of Stone Column Foundations", Ph.D. dissertation, Univ. of Glasgow, U.K, (1995).

19. Mccabe, B., Mcneill, J. and Black, J., "Ground Improvement Using the Vibro-stone Column Technique", Transactions of the Institution of Engineers of Ireland, Galway, (2007).

20. Rao, N., Madhiyan, S. M. and Prasad, Y. V. S. N., "Influence of Bearing Area on the Behaviour of Stone Columns", *Indian Geotechnical Conf.*, Calcutta: Pp. 235–237, (1992).

21. Malarvizhi S. and Ilamparuthi K. "Modeling of Geogrid Encased Stone Column", ICCMS-05, IIT Guwahati, India.A. Author 1 and B. Author 2, "Title of the Conference Paper", *Proc. Int. Conf. on Power System Reliability.* Singapore, Pp. 100-105, (2005).

۲۲. ارجمند، محمدعلی و زمانی، مجید، «بررسی تأثیر ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی ساختمان‌های با ارتفاع متوسط»، کنفرانس ملی مهندسی عمران و محیط زیست، قزوین (۱۳۹٤).

23. Nima, R., Nalbantoglu, Z. and Araujo, G., "3D Analysis of Full Scale Stone Column Reinforced Soft Clay: Numerical Evaluation", COBRAMSEG 2014, Goiânia, Vol. 1, (2014).